

Research on Reinforcement Effect of MJS in Long-distance Foundation Pit Adjacent to Existing Railway

Zhanfeng Li¹ Fei Song^{2*} Yanzhe Bi¹ Jinxin Guo¹ Kai Wu¹

1. China Railway Shanghai Engineering Bureau Group Co., Ltd., Shanghai, 200436, China
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, 610031, China

Abstract

The existing subway line 1 in Fuzhou is parallel to the main foundation pit of a newly built station for a long distance. The excavation construction of the station foundation pit may cause excessive deformation of the existing line, affecting its safe operation. Therefore, the gantry MJS (Metro Jet System) construction method pile is used for reinforcement treatment. To analyze the reinforcement effect of MJS construction method piles, three-dimensional finite element numerical simulation was used to compare the horizontal displacement, base uplift, and existing line deformation of the interlocking piles between the reinforcement scheme and the unreinforced scheme. The results show that the MJS construction method pile can reduce the horizontal displacement and base uplift of the interlocking pile on the one hand, and effectively control the horizontal displacement of the existing line on the other hand, with good reinforcement effect.

Keywords

metro station; existing line; parallel; MJS construction method; reinforcement design

基坑长距离近接既有线 MJS 加固效果研究

李展峰¹ 宋飞^{2*} 毕延哲¹ 郭金鑫¹ 伍凯¹

1. 中铁上海工程局集团有限公司, 中国·上海 200436
2. 西南交通大学土木工程学院, 中国·四川成都 610031

摘要

福州既有地铁1号线与某新建车站基坑主体长距离并行, 车站基坑开挖施工可能引起既有线变形过大, 影响其安全运营, 故采用门式MJS (Metro Jet System) 工法桩进行加固处理。为分析MJS工法桩的加固效果, 采用三维有限元数值模拟分析对比了加固方案和未加固方案的咬合桩水平位移、基底隆起和既有线变形。结果表明, MJS工法桩一方面可以减少咬合桩水平位移和基底隆起, 另一方面能有效控制既有线的水平位移, 加固效果良好。

关键词

地铁车站; 既有线; 并行; MJS工法; 加固设计

1 引言

现今城市发展日新月异, 城市交通建设对于城市发展的作用更是在许多城市得到极大重视。因城市地面交通的发展受到地面建筑的极大影响, 并且地面交通的速度不具优势, 有条件的城市现在着重开发地下空间, 对地铁的修建更为青睐。然而随着地铁工程的不断拓展, 许多城市地铁网呈现出既复杂又紧凑的格局, 新建线路区间或车站等与既有地铁线路出现并行、上跨、下穿的现象在建设过程中出现得越

来越多, 而新建建筑势必会对既有线路产生影响。例如会造成既有线路产生变形、开裂和结构强度下降等隐患。因此, 对于如何避免或降低既有线受到新建工程的影响这一问题, 就成为现在和今后新建地铁不得不考虑的工程难题。

福州某新建车站基坑主体, 与既有线地铁 1 号线区间小净距长距离并行, 车站基坑开挖施工可能引起既有线区间变形过大, 影响其安全运营。为此, 采用门式 MJS (Metro Jet System) 工法桩对既有 1 号线进行加固处理。目前, 中国在超大基坑长距离近接施工对既有线的研究方面研究尚不够完善, 加上施工中采用的 MJS 工法桩引进中国还不久, 国内也尚未有过采用门式 MJS 工法桩加固既有线的工程实践, 因此开展其加固效果研究是十分必要的。

论文通过数值模拟系统对比研究了未加固和采用 MJS 加固两种工况下的基坑支护桩位移、基坑隆起和既有线水平

【作者简介】李展峰 (1985-), 男, 中国陕西西安人, 本科, 工程师, 从事交通土建工程研究。

【通信作者】宋飞 (1998-), 男, 中国四川宜宾人, 硕士, 助理工程师, 从事市政工程研究。

位移情况,研究结论为既有1号线的加固提供了理论支撑,对类似工程具有较好参考价值。

2 工程概况

2.1 工程背景

福州某车站基坑主体,车站外包总长为290.7m,标准段宽22.74m。基坑开挖深度18.3~19.5m。如图1和图2所示,该车站东侧临近既有1号线区间,且两者长距离并行,既有1号线区间与车站结构之间水平净距为3.57~14.4m,区间底竖向绝对标高-8.67~11.13m,竖向最小净距约为2.1m,基本同车站主体基坑,车站基坑开挖可能引起1号线区间变形过大,影响1号线安全运营。

2.2 工程地质条件

场地内主要地层有杂填土、淤泥、粉质粘土、淤泥质土、残积砂质粘性土、全风化花岗岩、全风化石英正长斑岩、砂土状强风化花岗岩、碎块状强风化花岗岩。

2.3 基坑支护方案

基坑安全等级为一级,基坑围护结构最大水平位移控制标准为:围护结构最大水平位移 $\leq 0.25\%H$,且 $\leq 30\text{mm}$ 。车站围护结构采用全套管咬合桩,为节约成本并

保证设计安全性,所以考虑在与既有1号线接近一侧的咬合桩增大桩径,即既有线一侧为 $\phi 1200@800$,靠近既有线一侧为 $\phi 1400@1000$;基坑开挖支撑共5道支撑,第一道和第三道支撑采用混凝土支撑,第四道和第五道钢支撑采用轴力伺服系统。

2.4 既有1号线MJS加固方案

2.4.1 MJS工法加固原理

MJS工法最初是由日本高压旋喷专家中西涉先生开发改进的^[1]。传统的高压旋喷技术因为其压力过大、对环境的影响大等特点,受限的地方很多。在此基础上,相较于传统高压旋喷技术采用独特多孔管、强制吸浆装置和前端压力监测装置,一方面通过主动排泥装置实现强制排浆,另一方面通过监测地下压力反馈给施工,控制吸浆孔大小以实时调整排浆量来保证泥浆压力稳定。改进后的工法适应于更加严苛更加多样的施工环境,并且通过以上改进后,对于垂直施工、倾斜施工、水平施工的工况具有非常好的适应性,可以进行多角度施工,故又称全方位高压喷射工法。

MJS工法在上海、广州、南京等地进行了多次运用,包括深基坑支护施工、土体加固^[2]、地连墙修复^[3]和防渗^[4]方面均取得了良好的效果^[5]。

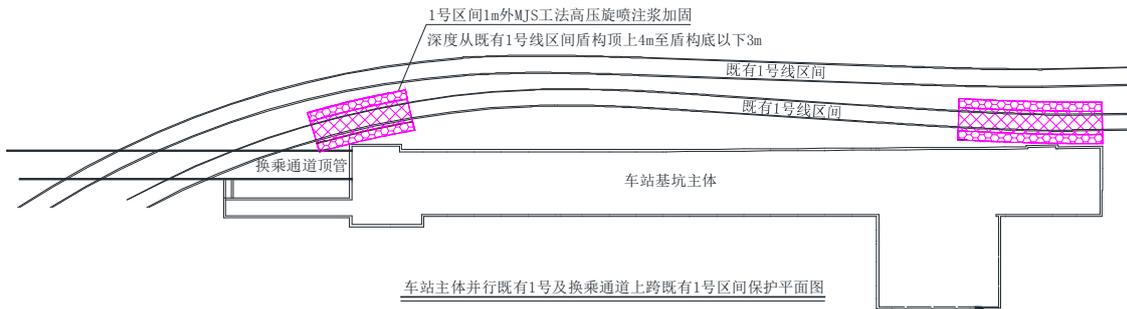


图1 车站基坑与既有1号线关系平面示意图

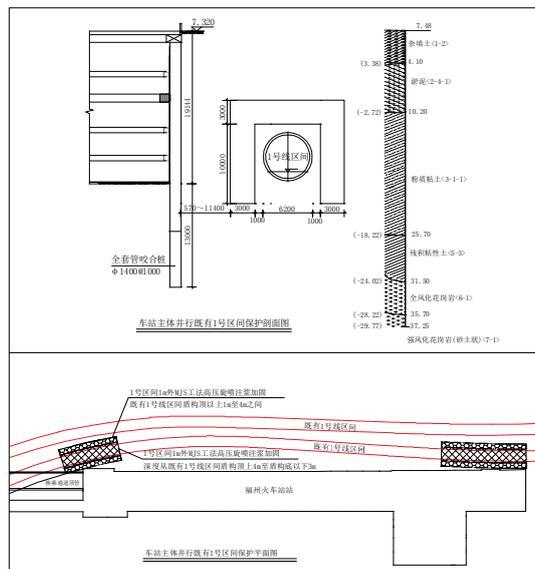


图2 车站基坑与既有1号线关系剖面示意图

2.4.2 既有1号线加固方案

为确保既有1号线的正常运营安全,采用MJS工法施工对1号线盾构区间两侧1.0m外范围及上方进行注浆加固,形成门式加固体来阻断减弱车站基坑开挖产生的应力,减少和降低1号线区间的变形,如图2所示。表1为MJS工法桩的技术参数。图3为MJS工法桩现场施工场景照片。

表1 MJS工法桩技术参数

项目	数值	单位
水灰比	1 : 1	—
浆液喷射压力	40	MPa
浆液流量	85~100	L/min
空气压力	0.6~0.7	MPa
空气流量	1~2	Nm ³ /min
钻杆转速	4	rpm
钻杆提升速度	40	min/m
地内压力	1.3~1.6的系数(视地质情况适当进行调节和控制)	—
成桩垂直度误差	≤ 1/100	—
成桩直径预估	2.0	m
MJS工法桩厚度	3.0	m



图3 MJS工法桩现场施工

3 基坑数值建模

3.1 模型本构及计算参数选取

针对不同的材料特性和工程实际选用合适的本构模型,对于工程数值模拟的准确性和功能性十分重要。

能过本次分析,土体采用实体单元,选用摩尔库仑本构模拟,内撑及桩体采用结构单元。土层主要物理力学参数如表2所示。MJS工法桩采用弹性体模拟,主要参数如表3所示。

3.2 有限元模型建立

基坑开挖段与既有线并行达到290.3m,标准段宽22.74m,基坑开挖深度18.3~19.5m,既有1号线区间与车站结构之间水平净距为3.57~14.4m。建模考虑网格划分的精细度和合理性,基坑深度取值19m,基坑底以下影响深度为2~3倍基坑深度,取40m,总高59m;基坑两侧影响宽度为3~4倍开挖深度,基坑宽度22m,咬合桩长度按设计值为33m,坑外土体范围在远离既有线侧为60m,近接既有线一侧为77m,总宽159m。同时将基坑长度截取其中24m,基坑侧壁与既有线之间的距离恒定为7m进行分析。

网格划分方面,基坑和既有线部分精度为1m,基坑边缘处取6m,其间梯度变化,竖向精度控制为1m。整个模型节点数40257,单元数40855。图4和图5分别为整体模型及咬合桩和内支撑的三维示意图。

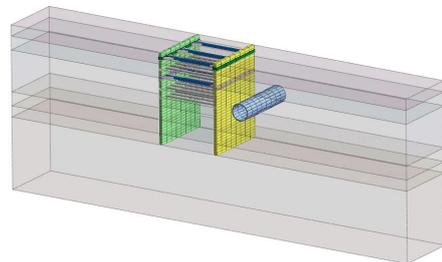


图4 整体三维模型

表2 主要物理力学参数表

地层编号及名称	厚度 (m)	重度 (kN/m ³)	变形模量 (MPa)	泊松比	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
< 1-2> 杂填土	3.38	18	13	0.42	5	12
< 2-4-1> 淤泥	6.1	15.8	6	0.42	11.7	8.6
< 3-1-1> 粉质粘土	15.5	18.6	18	0.3	31.7	15.6
< 5-3> 残积粘性土	5.8	17.5	16.9	0.38	16.7	25.4
< 6-1> 全风化花岗岩	4.2	18.3	30	0.35	15.4	26.1
< 7-1> 强风化花岗岩	1.55	20	45	0.25	30	32.0

表3 MJS工法桩桩体参数表

弹性模量 (MPa)	泊松比	重度 (kN/m ³)	加固厚度 (m)	桩与既有线距离 (m)
400	0.3	22	3	1

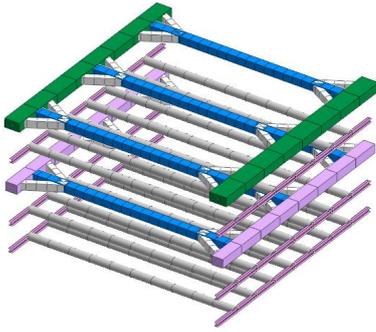


图5 支撑三维模型

3.3 模拟分析步骤

结合现场施工情况,此次基坑开挖分为土体初始状态、咬合桩施工、基坑开挖及支撑等几个阶段,详细模拟分析步骤如表4所示。

3.4 有限元模型验证

施工过程中,对基坑和既有线位移进行监测,包括对咬合桩水平位移、既有线水平和竖向位移进行监测。通过对监测结果和模拟结果,验证模型合理性。图6为开挖至基底时咬合桩水平位移图,远近两侧咬合桩实测最大水平位移分别4.77mm和5.95mm,均处于基坑底部上1m。模拟最大水平位移分别为5.40mm和5.57mm,均在基坑底部。模拟值与实测值较为接近,吻合效果较好,发展趋势一致,表明论文有限元模型分析结果合理。

4 MJS 加固效果研究

为探究MJS加固方案的有效性,针对既有线外围土体采用MJS工法桩加固的工况下基坑开挖对于既有线的变形特性进行数值模拟研究,并与未加固工况进行对比分析。

4.1 咬合桩变形分析

图7为MJS工法加固后车站基坑咬合桩的三维模型模拟计算结果云图,开挖完成后近既有线一侧咬合桩最大位移为5.57mm,较未加固时减小32.48%,对于远既有线一侧的咬合桩,远既有线一侧咬合桩最大位移为5.41mm,较未加固时减小29.10%。

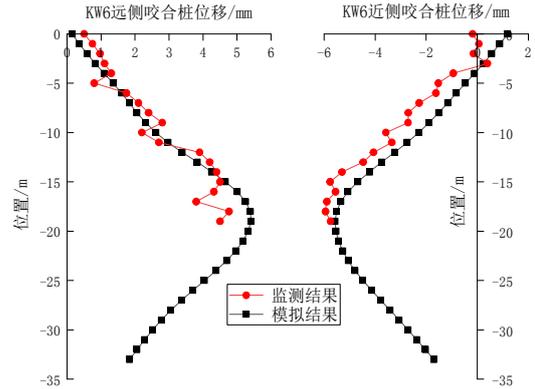


图6 KW6阶段咬合桩水平位移曲线图

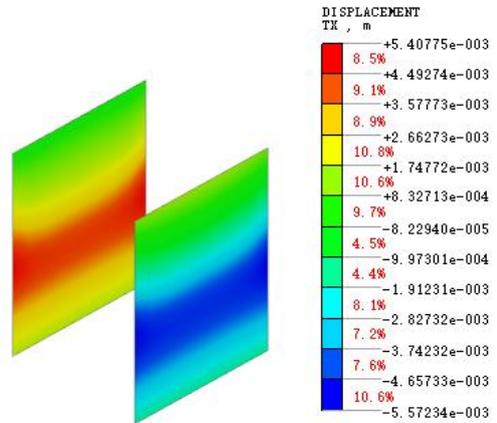


图7 咬合桩水平位移云图(加固后)

图8为采用MJS工法桩加固后的不同开挖阶段两侧咬合桩随深度变化的位移曲线图,可以发现:咬合桩水平位移随开挖逐渐增大,两侧咬合桩最大位移均发生在地面以下19m;因MJS工法桩的施工,对应土体重度增大,近既有线一侧咬合桩桩顶部分向坑外倾斜1~2mm,且随着开挖深度增大逐步向坑内移动。

表4 模拟分析步骤

步骤	工况详情
初始应力	计算初始应力场,设置位移清零以消除初始重力场的影响
既有线施工	模拟既有线形成,开挖隧道,激活衬砌并设置位移清零
MJS工法桩施工	MJS工法桩施工,位移清零
咬合桩施工	施工简化为地连墙的咬合桩,位移清零
基底加固	对基坑底部以下5m范围内进行三轴搅拌桩加固
KW1	开挖基坑第1层土至第1道支撑下0.5m,激活冠梁、第一道支撑
KW2	开挖基坑第2层土至第2道支撑下0.5m,激活第2道腰梁、支撑
KW3	开挖基坑第3层土至第3道支撑下0.5m,激活第3道腰梁、支撑
KW4	开挖基坑第4层土至第4道支撑下0.5m,激活第4道腰梁、支撑
KW5	开挖基坑第5层土至第5道支撑下0.5m,激活第5道腰梁、支撑
KW6	开挖基坑至基坑底部

图9和图10为两侧咬合桩位移相对于未加固时的变化曲线图,可以看出两侧咬合桩的位移相对未加固时均减小,减小率随开挖逐渐降低;开挖完成后,基坑底部处的咬合桩位移分别减小27.89%和29.12%,从该处往顶部和底部的咬合桩位移均逐渐增大,顶部咬合桩分别减小118.09%和97.52%,底部咬合桩分别减小44.22%和38.91%。可见基坑底部土体尤其是基底加固土具有类似“支点”的作用,对咬合桩位移的变化具有限制作用。

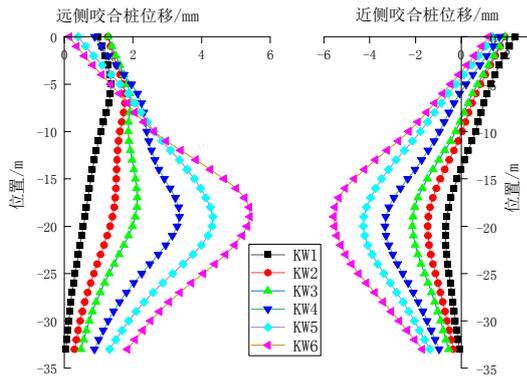


图8 咬合桩水平位移曲线图(加固后)

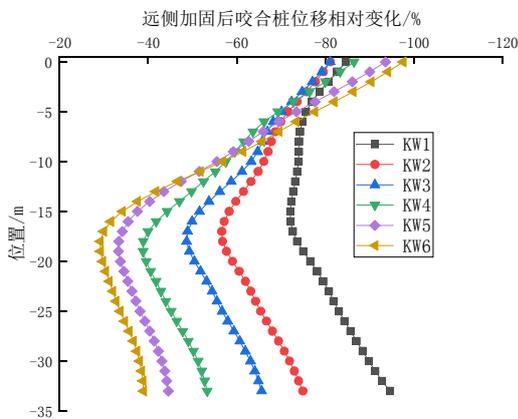


图9 远既有侧咬合桩位移相对变化曲线图

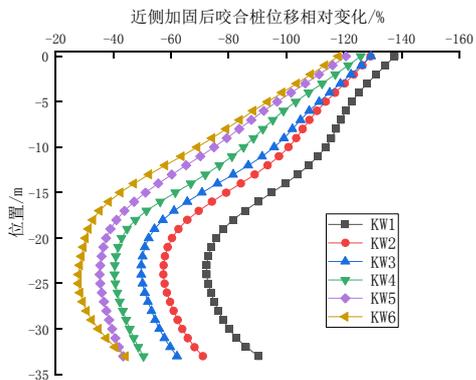


图10 近既有侧咬合桩位移相对变化曲线图

4.2 基底隆起分析

图11为既有线采用MJS工法桩加固后,土体竖向位移的数值模拟云图,基坑底部土体竖向位移值最大,最终基底隆起达到36.61mm,相对未加固时减小12.33%。图12为以基坑短边中点为原点,基坑宽度范围内底部隆起变形量曲线图。可以看到,与未加固时基底隆起趋势一致,随着开挖的进行,基底隆起量越来越大;靠近既有侧的隆起值始终较另一侧小2~2.5mm。

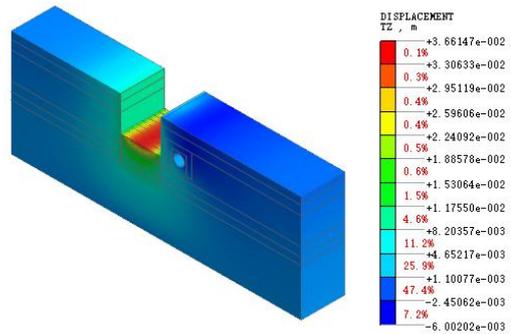


图11 基底隆起位移云图(加固后)

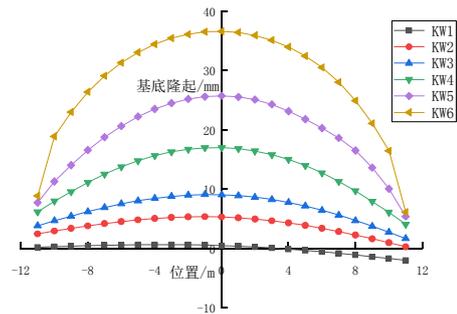


图12 基底隆起曲线图

图13采用MJS工法桩加固前后的基底隆起相对变化曲线图,基底隆起减小程度随着开挖进行逐渐减小,各开挖阶段以靠近既有侧的基底减小程度最大,基坑底部中间部分减小程度最小。开挖完成后靠近既有侧基底隆起减小34.07%,远离既有侧一侧和基坑底部中间减小25.04%和12.32%,一方面是因为MJS工法桩的存在使得该侧土体对开挖产生的荷载具备更强的抗变形能力,另一方面是因为加固土重度的增加有利于平衡一部分基底因卸荷产生隆起的力。

4.3 既有侧变形分析

对比既有侧的加固前后的水平位移,可以定量分析得到MJS工法加固桩对控制既有侧位移的效果,对于施工过程具有十分重要的指导意义。图14为加固后数值模拟的既有侧水平位移云图。由图可知,基坑开挖完成后,既有侧结构位移相对于未加固时有显著减小,向基坑方向最大位移4.19mm,相较于加固前减小了33.07%。可见,采用MJS工法桩加固后能够在极大程度上限制既有侧结构的位移。

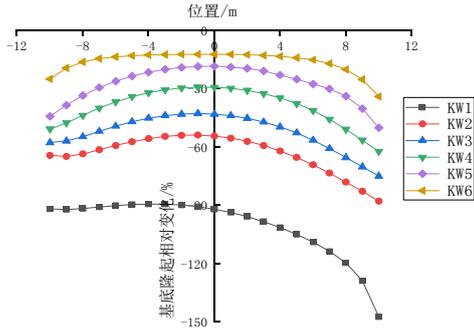


图 13 基底隆起相对变化曲线图

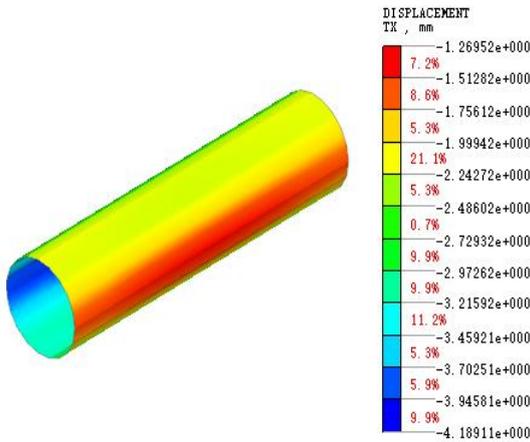


图 14 既有线水平位移云图与 (加固后)

图 15 为对比加固与否两种工况下既有线结构最大位移曲线图,根据曲线图,加固前后的开挖过程中既有线位移变化趋势一致,水平上始终整体向基坑方向偏移。

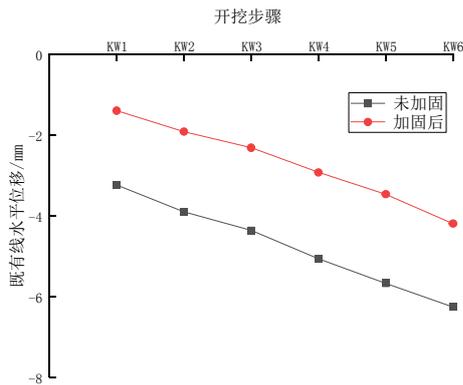


图 15 既有线加固前后水平位移对比曲线图

5 结论

论文依托福州某车站基坑主体与既有运营线长距离并行的工程实际,采用数值模拟对比研究了未加固工况和采用 MJS 工法桩加固既有有线工况的基坑围护桩水平变形、基底隆起及既有有线水平位移情况,主要得出如下结论:

①受 MJS 工法桩加固影响,在基坑开挖完成后,因 MJS 工法桩分担因基坑卸荷产生的应力,既有有线结构加固后向基坑方向水平最大位移为 4.19mm,相较于加固前减小了 33.07%,MJS 工法桩对既有 1 号线的加固保护效果明显。

②采用 MJS 工法桩对既有有线周围土体加固后,咬合桩水平位移较加固前减小,开挖完成后近既有有线一侧和远既有有线一侧咬合桩最大位移分别为 5.57mm 和 5.41mm,较未加固时分别减小 32.48% 和 29.10%,MJS 工法桩有效地限制了基坑变形。

③采用 MJS 工法桩加固后,基坑开挖完成后基底隆起最大值为 36.61mm,较加固前减小 12.33%,MJS 工法桩减小了基底隆起值。

参考文献

- [1] 张帆.二种先进的高压喷射注浆工艺[J].岩土工程学报,2010,32(S2):406-409.
- [2] Qi Y E, Guoquan W, Lanqiang Y, et al. Analysis of Influence of MJS(Metro Jet System) Pile Construction on Adjacent Existing Buildings in Soft Soil Area in Ningbo[J]. Tunnel Construction,2023 (11):15.
- [3] 于晓东,何国军,刘宝文,等.Underground continuous wall repairing method: CN102758458[P].
- [4] He J, Chen Z, Zhang K. Study on The Foundation of Ancient Seawall in Qian Tang River[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2013,27(5):217-221.
- [5] 梁利,李恩璞,王庆国,等.MJS工法在轻轨车站换乘通道中的工程实践[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):135-139.

致谢

本论文得到中铁上海工程局集团有限公司企业科技项目《复杂工况下滨海城市中心城区近接运营隧道城际快线安全建造技术》支持,致以诚挚谢意。